連載：スイッチング電源講座・第7.1回

共振形電源

山崎　浩

訂正・追加版

スイッチング電源のスイッチング周波数を高くする目的は，平滑用のコイルとコンデンサの形状を小さくするためです．周波数 f を 10 倍にするとコイルのインダクタンス値 L，コンデンサのキャパシタンス値 C が 1/10 でも同じ平滑効果が得られます．L 値，C 値が小さくて済むので形状も小さくできます．しかし，f を高くするとスイッチ素子の損失が増え，その発熱が小形化を制約します．

スイッチング損失

パワー MOS-FET のスイッチング過程を第 1 図に示します．ドレイン-ソース間電圧 V_{DS} またはドレイン電流 ID の一方が大きくなると他方が小さくなります．この関係はハードスイッチングと呼ばれ，スイッチング損失 P_{SW} は f に比例します．

$$P_{SW}{}^{*}=1/6\cdot V_{DS}\times I_{D}\cdot(t_{on}+t_{off})\cdot f$$

ただし，t_{on} はターンオン時間，t_{off} はターンオフ時間

なお，スイッチ素子内で発生する損失にはスイッチング期間のスイッチング損失 P_{SW}，オン期間に発生する飽和損失 P_{sat}，オフ期間の漏れ損失 Pleak の合計で，P_{sat} と P_{leak} は高周波化によって増加しません．

* バイポーラ・トランジスタの場合は $P_{SW}=V_{DS}\times I_{D}\cdot(1/6\cdot t_{on}+1/2\cdot t_{off})\cdot f$

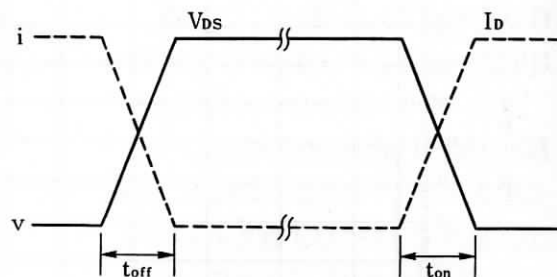
共振形の原理

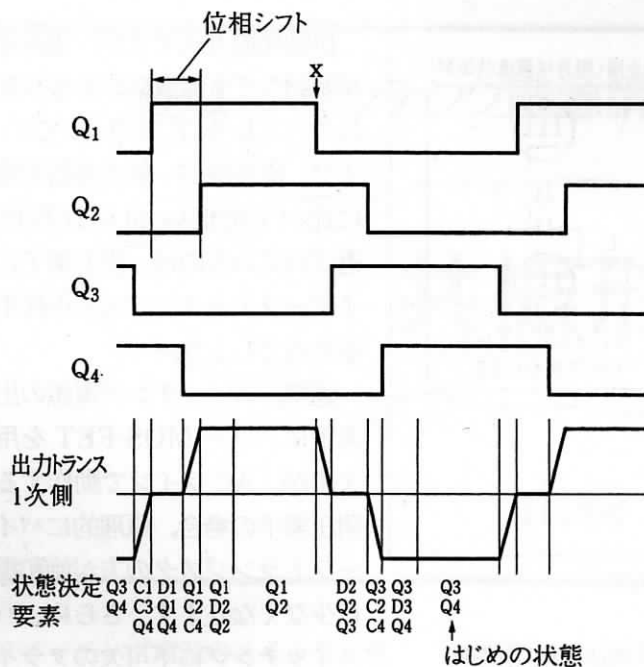
スイッチング期間に V_{DS} あるいは I_D のいずれか一方をゼロにすれば P_{SW} もゼロになります．スイッチ素子と負荷を含む閉回路に L，C を追加することにより第 2 図(a)のように一方を円弧状に丸めます．この方式が共振形で，ソフトスイッチングとも呼ばれます．

スイッチ素子に流れる電流が円弧状になる場合を電流共振形，スイッチ素子に印加される電圧が円弧状になる場合は電圧共振形と呼ばれます．スイッチング期間に一方が 0 だから，P_{SW} も 0 になります．しかし，追加したコイルまたはコンデンサの内部損失が加わるので，スイッチング電源全体の効率が高くなるとは限りません．

円弧を描く共振形は比較的大きい L，C を必要とします．L，C を小さくすると第 2 図(b)のように，特定周波数で振動（リンギング）する波形になります．見栄えは悪いもののソフトスイッチングであり，P_{SW} を抑制する効果はおなじです．ハードスイッチングに比べ dv/dt，di/dt が小さい（スイッチングの速さが遅い）ので電磁ノイズも低くなります．

ZVS コンバータ

ZVS (Zero-Voltage-Switching) はパワー MOS-FET のドレイン-ソース間寄生容量 Coss を共振素子として利用する，ソフトスイッチングの一方式です．第 3 図に大電力用のトランス絶縁形 ZVS コンバータを示します．第 4 図に示すタイミングで Q_1～Q_4 をオン，オフすると出力トランスの 1 次側に Zero-Voltage-Switching 出力が得られます．L_1，LR_1 はそれぞれトランスの 1 次側，2 次側の漏れインダクタンスです．

t_{off}, t_{on} 期間に発生する損失 $P_{SW}=\frac{1}{6}V_{DS}\times I_D\times(t_{on}+t_{off})\times f$

〈第 1 図〉パワー MOS-FET のハード・スイッチング過程

〈第4図〉ZVSコンバータ出力段の位相シフト駆動

** 特許2722869号(1991年出願)より引用．なお，同社の最新のパワーアンプMX-D1では88 kHz他励発振方式に変更されています．

共振形スイッチング電源の問題点

現状の共振形スイッチング電源は制御が複雑で，電源変動や負荷変動に弱い欠点もあります．高い効率を維持しつつ，共振動作させるためには高周波で損失の少ない電力用フィルムコンデンサが必要です．

高周波特性に優れるスチロールは熱に弱く，電力用には使えません．耐熱性があり安価なポリエチレン(PE)は損失が大きく***，高周波化には不適当です．耐熱性があり，しかも高周波損失の少ない材質はマイカとテフロンですが，品種は少なく，高価です．やむを得ずポリプロピレン(PP)を使用せざるを得ませんが，形状はPEに比べて大きく(約2倍)，耐熱性もせいぜい120℃と低いことが弱点です．

コンピュータ向けスイッチング電源が軽薄短小を追い続ける風潮は，今後も継続するでしょう．共振形電源の設計はハードスイッチングのPWM (Pulse Width Modulation) 方式より格段に難しく普及を拒んでいます．しかし，オーディオ機器の最重要課題をノイズ抑制とするのであれば，ソフトスイッチングすなわち共振形電源に移行せざるを得ません．

*** PEは材質の損失tan δが大きいだけでなく，電極抵抗成分のバラツキが大きい．他方，PPはtan δが小さい特徴をキャッチフレーズとする前提から，電極抵抗成分は管理され，バラツキは小さい．

(つづく)

〈お詫び〉
前号〈第7回〉の図面が本文と相違して入ってしまいました．お詫びして訂正いたします．そのため連載回数は「7.1」とさせていただきます．

〈第5図〉
ヤマハPS (Power Strem)
電源回路例
(特許公報2722869号より引用)